

ANALISIS TEGANGAN-REGANGAN, TEKANAN AIR PORI DAN STABILITAS MODEL DAM TIMBUNAN TANAH

Oktovian B. A. Sompie

Dosen Pascasarjana Program Studi S2 Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi

Christian Pontororing

Pascasarjana Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi

ABSTRACT

The need of dam is considered necessary for an area, the residential area located in the Watershed (DAS) experience frequent flooding when the river water is at high water level. That is why we need to learn the behavior of the soil embankment dams associated with the stress-strain, pore water pressure and stability to obtain a soil embankment dam design is safe from collapse or failure. Various ways can be done to analyze it, one of which program is to make a model dam with a calculation using the program Plaxis. In modeling this dam soil was taken from the site Doloduo II, Kotamobagu, namely silty clay then modeled in an experimental box. Dams were given treatment in the form of the addition of water to a certain height. Dam stability is observed with pore water pressure and other things that happened in the modeling, then compared with analysis using Plaxis 3D Foundation program is made in three calculation process.

Keyword: Modeling of dam, Stress-Strain, Pore Water Pressure, Program Plaxis.

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Kebutuhan pembangunan konstruksi bendungan di anggap perlu untuk suatu daerah, dimana daerah tersebut merupakan kawasan rumah penduduk yang terletak di Daerah Aliran Sungai (DAS) yang sering terjadi banjir ketika air sungai berada pada muka air tinggi. Adapun konstruksi yang material bangunannya adalah tanah merupakan suatu konstruksi yang biayanya tergolong murah, jika dibandingkan dengan konstruksi beton, dsb. Namun selain ditinjau dari segi biaya, konstruksi dam timbunan tanah ini juga harus diperhatikan segi kekuatannya. Apalagi fungsi dari dam itu sendiri yang harus mampu menahan air pada suatu aliran sungai. Maka, perlu dipelajari bagaimana perilaku bendungan timbunan dikaitkan dengan tegangan-regangan, tekanan air pori dan stabilitas untuk memperoleh suatu desain bendungan timbunan tanah yang aman dari keruntuhan atau kelongsoran, penurunan yang berlebihan, pergeseran tanah dan rembesan yang terlalu besar serta ekonomis.

Rumusan Masalah

Dengan diperolehnya data parameter tanah dari uji laboratorium akan dibuat suatu pemodelan bendungan yang kemudian dipelajari

untuk menentukan nilai tegangan-regangan, tekanan air pori dan faktor keamanan dengan metode elemen batas pada program *Plaxis*.

Pembatasan Masalah

Pembatasan masalah ini meliputi hal – hal sebagai berikut :

1. Perilaku tegangan-regangan adalah tegangan regangan total
2. Perilaku tekanan air pori adalah tekanan pori aktif
3. Kestabilan dam, ditentukan oleh hasil faktor keamanan
4. Metode yang digunakan adalah *Finite Element Method* (FEM) pada program komputer *Plaxis*.
5. Beban yang dihitung hanya berupa berat sendiri tanah bendungan.

Tujuan Penelitian

Mengetahui kondisi dam timbunan melalui pemodelan dan untuk memperoleh nilai tegangan-regangan, tekanan air pori, dan faktor keamanan

Manfaat Penelitian

Mendapatkan suatu desain bendungan timbunan tanah yang aman dan ekonomis untuk daerah tertentu yang sering terjadi banjir diakibatkan meluapnya air sungai.

TINJAUAN PUSTAKA

Dam Timbunan Tanah (*earthfill dam*)

Menurut ICOLD (*International Commition On Large Dams*) dam timbunan tanah atau juga disebut bendungan urugan tanah didefinisikan sebagai bendungan yang dibangun dari hasil penggalian bahan (material) tanpa tambahan bahan lain yang bersifat campuran secara kimia, jadi betul-betul bahan pembentuk bendungan asli.

Tipe bendungan dalam disain ini berdasarkan konstruksinya adalah bendungan urugan serbasama (*homogeneous dams*). Sering disebut sebagai bendungan urugan tanah, biarpun sesungguhnya kurang tepat karena pengertiannya lebih luas. Bendungan urugan serba sama merupakan bendungan yang lebih dari setengah volumenya terdiri dari bahan bangunan yang seragam.

Sementara berdasarkan fungsinya, tipe bendungan ini disebut bendungan sisi (*high level dam*) karena terletak disebelah sisi kiri dan atau sisi kanan bendungan utama yang tinggi puncaknya juga sama. Ini dipakai untuk membuat proyek se optimal-optimalnya, artinya dengan menambah tinggi pada bendungan utama diperoleh hasil yang sebesar-besarnya biarpun harus menaikkan sebelah sisi kiri dan atau sisi kanan. Namun dalam kasus ini bendungan juga berfungsi sebagai talud untuk mencegah banjir.

Tegangan dalam Tanah

Bahasan ini mengenai prinsip-prinsip perhitungan besarnya kenaikan tegangan pada tanah yang diakibatkan oleh bermacam-macam pembebanan berdasarkan pada teori elastis. Biarpun tanah secara aslinya sebagian besar adalah tidak elastis penuh, tidak isotropis, dan juga tidak homogen, perhitungan untuk memperkirakan besarnya kenaikan tegangan umumnya memberi hasil yang cukup baik untuk maksud-maksud praktis di lapangan.

Tegangan akibat berat sendiri tanah

1. Tegangan normal total

Merupakan perkalian dari berat volume tanah dengan kedalaman titik yang ditinjau. Dengan tidak memperhitungkan pengaruh air, persamaannya adalah sebagai berikut:

$$\sigma = \gamma \cdot Z \quad (2.1)$$

2. Tegangan efektif

Merupakan tegangan dalam tanah yang dipengaruhi oleh gaya-gaya dari air yang terdapa di dalam tanah. Pertama kali diperkenalkan oleh Terzaghi tahun 1923 berdasarkan hasil percobaan. Diaplikasikan pada tanah yang jenuh air dan berhubungan dengan dua tegangan:

a. Tegangan normal total (σ)

b. Tekanan air pori (u)

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2.2)$$

$$u = \gamma_w \cdot Z \quad (2.3)$$

$$\sigma' = (\gamma - \gamma_w)Z$$

$$\sigma' = \gamma' \cdot Z \quad (2.4)$$

Stabilitas Konstruksi Bendungan

Merupakan perhitungan konstruksi untuk menentukan ukuran (dimensi) bendungan agar mampu menahan muatan-muatan dan gaya-gaya yang bekerja padanya dalam keadaan apapun juga.

Syarat-syarat stabilitas konstruksi

1. Lereng disebelah hulu dan hilir harus tidak mudah longsor
2. Harus aman terhadap geseran
3. Harus aman terhadap penurunan bendungan
4. Harus aman terhadap rembesan

Keadaan berbahaya yang harus ditinjau di dalam perhitungan

Ada 4 keadaan yaitu:

1. Pada akhir pembangunan.

Berdasarkan penyelidikan tanah, baik di lapangan maupun laboratorium dapat diambil kesimpulan bahwa tanah hanya dapat dipakai secara maksimal apabila kadar airnya mencapai optimal. Ini berarti bahwa pada akhir pembangunan masih terdapat kadar air yang besar, sehingga tegangan pori yang timbul juga besar. Kadar air yang besar, sehingga tegangan pori yang timbul juga besar. Keadaan berbahaya yang harus ditinjau adalah daerah kemiringan sebelah hilir.

2. Pada waktu waduk terisi air penuh dan terdapat rembesan tetap.

Makin tinggi permukaan air yaitu pada saat waduk terisi air penuh merupakan keadaan yang berbahaya, sehingga ditinjau dalam perhitungan. Keadaan berbahaya yang harus ditinjau adalah kemiringan sebelah hilir.

3. Pada waktu waduk terisi air sebagian dan terdapat rembesan tetap.

Ini perlu ditinjau karena longsohnya bendungan tergantung dari beberapa factor dan kadang-kadang yang berbahaya justru bukan

pada waktu waduk penuh tetapi hanya sebagian saja. Keadaan berbahaya ini harus ditinjau adalah kemiringan sebelah hulu.

4. Pada waktu waduk terisi air penuh dan turun secara tiba-tiba.

Pada waktu waduk terisi air penuh maka tekanan air porinya sangat besar, bagian di dalam waduk mendapatkan tekanan air ke atas sehingga beratnya berkurang. Pada waktu permukaan tiba-tiba maka air dari pori-pori akan sangat lambat hilangnya sehingga masih terisi air dan dalam keadaan basah maka beratnya menjadi bertambah besar karena tekanan air ke atas tidak ada lagi. Keadaan berbahaya yang harus ditinjau adalah disebelah hulu.

Klasifikasi Gerakan Tanah

Tipe gerakan tanah dibagi menjadi lima kelompok utama yaitu: runtuh, jungkir, longsoran, penyebaran lateral dan aliran. Kelompok keenam adalah majemuk yaitu kombinasi dua atau lebih tipe gerakan tersebut di atas. Adapun kelima tipe gerakan tanah dapat diuraikan sebagai berikut:

Runtuhan

Runtuhan merupakan gerakan tanah yang disebabkan runtuh tarik yang diikuti dengan tipe gerakan jatuh bebas akibat gravitasi. Pada tipe runtuh ini massa tanah atau batuan lepas dari suatu lereng atau tebing curam dengan sedikit atau tanpa terjadi pergeseran (tanpa bidang longsoran) kemudian meluncur sebagian besar di udara seperti jatuh bebas, loncat atau menggelundung. Runtuhan tanah dapat terjadi bila material yang di bawah lebih lemah (antara lain karena tererosi, penggalan) dari pada lapisan di atasnya. Runtuhan batuan dapat terjadi antara lain karena adanya perbedaan pelapukan, tekanan hidrostatik karena masuknya air ke dalam retakan, serta karena kelemahan akibat struktur geologi (antara lain kekar, sesar, pelapisan).

Jungkiran

Jungkiran adalah jenis gerakan memutar ke depan dari satu atau beberapa blok tanah/batuan terhadap titik pusat putaran di bawah massa batuan oleh gaya gravitasi dan atau gaya dorong dari massa batuan di belakangnya atau gaya yang ditimbulkan oleh tekanan air yang mengisi rekahan batuan. Jungkiran ini biasanya terjadi pada tebing-tebing yang curam dan tidak mempunyai bidang longsoran.

Longsoran

Longsoran adalah gerakan yang terdiri dari regangan geser dan perpindahan sepanjang bidang longsoran di mana massa berpindah melongsor dari tempat semula dan terpisah dari massa tanah yang mantap. Dalam hal ini, keruntuhan geser tidak selalu terjadi secara serentak pada suatu bidang longsoran, tapi dapat berkembang dari keruntuhan geser setempat. Jenis longsoran dibedakan menurut bentuk bidang longsoran yaitu rotasi (mendatar) dan translasi, dan dapat dibagi lagi : (a) material yang bergerak relatif utuh dan terdiri dari satu atau beberapa blok dan (b) material yang bergerak dan sangat berubah bentuknya atau terdiri dari banyak blok yang berdiri sendiri.

Longsoran rotasi adalah longsoran yang mempunyai bidang longsor berbentuk : setengah lingkaran, log spiral, hiperbola atau bentuk lengkung tidak teratur lainnya.. Retakan-retakannya berbentuk konsentris dan cekung ke arah gerakan dan dilihat dari atas berbentuk sendok. Rotasi bisa terjadi tunggal, ganda atau berantai.

Longsoran translasi umumnya ditentukan oleh bidang lemah seperti sesar, kekar pelapisan dan adanya perbedaan kuat geser antar lapisan atau bidang kontak antara batuan dasar dengan bahan rombakan di atasnya. Untuk translasi berantai gerakannya menjalar secara bertahap, ke atas lereng akibat tanah di belakang gawak sedikit demi sedikit diperlemah oleh air yang mengisi retakan-retakan.

Penyebaran Lateral

Penyebaran lateral adalah gerakan menyebar ke arah lateral yang ditimbulkan oleh retak geser atau retak tarik. Tipe gerakan ini dapat terjadi pada batuan ataupun tanah. Penyebaran lateral dapat dibedakan dalam dua tipe yaitu :

- a. Gerakan yang menghasilkan sebaran yang menyeluruh dengan bidang geser atau zona aliran plastis yang sulit dikenali dengan baik. Gerakan ini banyak terjadi pada batuan dasar, terutama yang terletak pada puncak tebing.
- b. Gerakan yang mencakup retakan dan penyebaran material yang relatif utuh (batuan dasar atau tanah), akibat pencairan (liquefaction) atau alir plastis material di bawahnya. Blok di atasnya dapat ambles, melongor, memutar, hancur mencair dan mengalir. Mekanisme gerakan ini tidak saja rotasi dan translasi tetapi juga aliran. Karena

itu penyebaran lateral ini dapat bersifat majemuk.

Aliran

Aliran adalah jenis gerakan tanah di mana kuat geser tanah kecil sekali atau boleh dikatakan tidak ada, dan material yang bergerak berupa material kental. Termasuk dalam tipe ini adalah gerakan yang lambat, berupa rayapan pada massa tanah plastis yang menimbulkan retakan tarik tanpa bidang longsoran.

Rayapan di sini dianggap sama dengan arti rayapan pada mekanika bahan yaitu deformasi yang terjadi terus menerus di bawah tegangan yang konstan. Pada material yang tidak terkonsolidasi, gerakan ini umumnya berbentuk aliran, baik cepat atau lambat, kering atau basah. Aliran pada batuan sangat sulit dikenali karena gerakannya sangat lambat dengan retakan-retakan yang rapat dan tidak saling berhubungan yang menimbulkan lipatan, lenturan atau tonjolan.

Majemuk

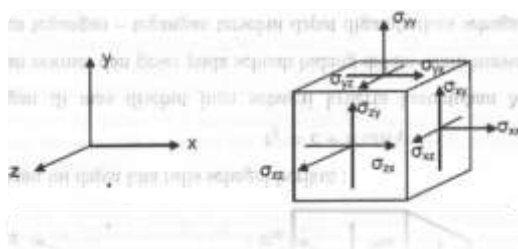
Majemuk merupakan gabungan dua atau lebih tipe gerakan tanah seperti diterangkan di atas

Program Plaxis

Plaxis adalah paket program finite elemen untuk analisa 2 dimensi dari deformasi dan stabilitas dalam rekayasa geoteknik. Dengan program ini kita dapat mengetahui faktor keamanan dari suatu lereng. Plaxis mulai dikembangkan sekitar tahun 1987 di *Technical University of Delft* atas inisiatif dari *Dutch Departement of Public Works and Water Management*.

Plaxis adalah program elemen hingga untuk aplikasi geoteknik dimana digunakan model-model tanah untuk melakukan simulasi terhadap perilaku dari tanah.

Tegangan



Gambar 1. Sistem koordinat, contoh pada bidang kerja dan indikasi komponen tegangan positif (sumber: *Plaxis 2D*, 1998)

Tegangan adalah sebuah gaya tarik/tekan yang mana dapat ditunjukkan oleh sebuah Matriks dalam koordinat Cartesius (sumbu x,y dan z). Dalam kondisi tegangan tarik adalah simetris dalam teori deformasi standar, tegangan ditulis dalam notasi vector, yang mana hanya meliputi enam komponen:

$$\sigma = (\sigma_{xx} \sigma_{yy} \sigma_{zz} \sigma_{xy} \sigma_{yz} \sigma_{zx})^T \dots\dots\dots (1)$$

Berdasarkan pada prinsip Terzaghi, tegangan dalam tanah dibagi kedalam tegangan efektif, σ' dan tekanan pori σ_w

$$\sigma = \sigma' + u \dots\dots\dots (2)$$

Regangan

Regangan adalah sebuah alat penarik/pengencang yang mana dapat ditunjukkan oleh sebuah Matriks dalam koordinat Cartesius (sumbu x,y dan z). Dibawah kondisi diatas, regangan sering kali ditulis dalam notasi vector, yang mana hanya meliputi enam komponen:

$$\varepsilon = (\varepsilon_{xx} \varepsilon_{yy} \varepsilon_{zz} \varepsilon_{xy} \varepsilon_{yz} \varepsilon_{zx})^T \dots\dots\dots (3)$$

Ukuran isi regangan didefinisikan 208 iterasi untuk pemadatan dan positif untuk pemuaian. Untuk jenis elastoplastis, sebagaimana digunakan dalam Plaxis, regangan dikomposisikan kedalam elastic dan komponen plastis.

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \dots\dots\dots (4)$$

Tekanan Pori

Tekanan pori umumnya berasal dari air di dalam pori. Air setelah dipertimbangkan tidak untuk menopang tegangan geser. Sebagai hasil, tegangan geser adalah sama dengan jumlah tegangan geser. Komponen tegangan normal positif telah dipertimbangkan untuk melaksanakan tegangan tarik. Mengingat, air dianggap sebagai bahan isotropis, jadi semua tekanan pori dianggap sama. Karena itu, tekanan pori dapat dihasilkan oleh sebuah nilai, p_w

$$\varepsilon = (\rho_w \rho_w \rho_w 000)^T \dots\dots\dots (5)$$

Model Mohr-Coulomb

Model yang sederhana namun handal ini didasarkan pada parameter-parameter tanah yang

telah dikenal baik dalam praktek rekayasa teknik sipil. Model Mohr-Coulomb dapat digunakan untuk menghitung tegangan pendukung yang realistis pada muka terowongan, beban batas pada pondasi dan lain-lain. Model ini juga dapat digunakan untuk menghitung faktor keamanan dengan pendekatan 'Reduksi phi-c'.

Jenis Kalkulasi

Parameter pertama yang akan mengatur kapan mendefinisikan tahap perhitungan adalah Jenis perhitungan. Hal ini dilakukan dalam kotak kombo di sisi kanan atas dari lembar tab Umum. Perbedaan dibuat antara empat jenis dasar perhitungan: perhitungan Plastis (*plastic*), analisis Konsolidasi (*consolidation*), beban gravitasi (*gravity loading*) dan prosedur Ko (*Ko procedure*). Dua jenis terakhir hanya tersedia untuk tahap awal.

- Kalkulasi Plastis

Sebuah perhitungan Plastis digunakan untuk melakukan analisis deformasi elastis plastis menurut teori deformasi kecil. Matriks kekakuan dalam perhitungan plastis didasarkan pada geometri pembentukannya asli. Jenis perhitungan yang tepat dalam aplikasi geoteknik adalah yang paling praktis. Secara umum, perhitungan plastik tidak mengambil efek waktu ke dalam perhitungan kecuali bila model Tanah Lunak digunakan.

Mengingat beban cepat dari air tanah dipenuhi banyak jenis, perhitungan Plastik dapat digunakan untuk kasus pembatasan perilaku sepenuhnya dikeringkan menggunakan pilihan pengeringan dalam set data material. Di sisi lain, melakukan analisis sepenuhnya bisa dikeringkan menilai penyelesaian dalam jangka panjang. Ini akan memberikan prediksi yang cukup akurat tentang situasi akhir, meskipun sejarah pembebanan yang tepat tidak diikuti dan proses konsolidasi yang tidak ditangani secara eksplisit.

- Analisis Konsolidasi

Sebuah analisis Konsolidasi biasanya dilakukan bila diperlukan untuk menganalisis perkembangan dan kemampuan untuk mengurangi tekanan pori berlebih dalam tanah liat-jenis jenuh sebagai fungsi waktu. PLAXIS 3D memungkinkan untuk benar analisis konsolidasi plastis yang elastis. Secara umum, konsolidasi analisis tanpa beban tambahan dilakukan setelah perhitungan plastik ditiriskan. Hal ini juga memungkinkan untuk menerapkan beban selama analisis konsolidasi. Namun, perawatan harus dilakukan ketika Situasi

kegagalan ini mendekat, karena proses iterasi tidak mungkin saling bertemu dalam situasi seperti ini.

- Beban Gravitasi

Beban Gravitasi adalah jenis perhitungan Plastis, di mana tegangan awal yang dihasilkan berdasarkan berat volumetrik tanah. Semua pilihan yang tersedia untuk perhitungan Plastis yang tersedia. Dalam analisis memuat Gravitasi proporsi relatif berat dinaikkan dari 0 ke 1. Dalam semua fase setelah fase awal, berat tanah penuh tetap diaktifkan. Beban gravitasi hanya tersedia untuk tahap perhitungan awal.

- Prosedur K0

Prosedur K0 hanya tersedia untuk tahap perhitungan awal. Ini adalah metode perhitungan yang dapat digunakan untuk menentukan tegangan awal untuk model, dengan mempertimbangkan berat sendiri tanah.

METODE PENELITIAN

Jenis data yang diperoleh dalam penelitian ini adalah data kualitatif (merupakan data deskriptif atau dalam bentuk uraian) dan data kuantitatif (merupakan data dalam bentuk angka-angka). Dimana berasal dari dua sumber yaitu:

- (1) Data Primer, merupakan data yang diperoleh dari pemeriksaan tanah di laboratorium;
- (2) Data Sekunder, merupakan data yang diperoleh dari 209 literatur atau buku-buku referensi yang digunakan sebagai bahan acuan dalam penelitian ini.

Metode analisis yang digunakan bersifat deskriptif dan kuantitatif dengan memberikan penelitian terhadap obyek yang akan diteliti, dalam hal ini dilakukan pemodelan. Adapun pendekatan model yang dilakukan adalah suatu kondisi rencana dilapangan, yang dibuat dalam skala kecil dengan menyamakan kondisi geometri, parameter tanah dan pembatasan daerah tinjauan.

Teknik analisis yang digunakan untuk memperoleh perilaku tegangan-regangan, tekanan air pori dan stabilitas dalam disain dan timbunan tanah adalah dengan langkah-langkah sebagai berikut: (1) Mengidentifikasi parameter-parameter tanah pada sampel tanah yang di uji di laboratorium; (2) Membuat pemodelan bendungan timbunan tanah; (3) Analisis hasil pemodelan; (4) Buat desain bendungan timbunan tanah pada program *plaxis*.

Tabel 2. Parameter yang digunakan dalam input program plaxis (sumber: hasil laboratorium)

Parameter	Nama	Tanah Dasar	Tubuh Bendung	Satuan
Material model	Model	MC	MC	-
Type of behavior	Type	Undrained	Undrained	-
Berat volume tanah kering	γ_d	14.80	14.80	KN/m ³
Berat volume tanah	γ	15.17	17.47	KN/m ³
Permeabilitas horizontal	k_x	6.03×10^{-3}	0.00	m/day
Permeabilitas vertical	k_y	6.03×10^{-3}	0.00	m/day
Modulus Elastisitas	E	172	24193.5	KN/m ²
Angka Poisson	ν	0.35	0.3	-
Kohesi	c	7.65	30.00	KN/m ²
Sudut geser dalam	ϕ	20.55	25.09	°

Kemudian dikalkulasi, dengan menggunakan tiga proses kalkulasi sebagai berikut:

Tabel 3. Proses kalkulasi pertama (sumber: hasil penelitian)

Identification	Phase No.	Start from	Calculation type	Loading input	Time	First	Last	Log info
Initial phase	0	N/A	K0 procedure	Staged construction	0.00 day			Not calculated.
<Phase 1>	1	0	Plastic	Staged construction	0.00 day	2	26	No errors.

Tabel 4. Proses kalkulasi kedua (sumber: hasil penelitian)

Identification	Phase No.	Start from	Calculation type	Loading input	Time	First	Last	Log info
Initial phase	0	N/A	Gravity loading	Staged construction	0.00 day	1	1	No errors.
<Phase 1>	1	0	Plastic	Staged construction	0.00 day	2	25	No errors.

Tabel 5. Proses kalkulasi ketiga (sumber: hasil penelitian)

Identification	Phase No.	Start from	Calculation type	Loading input	Time	First	Last	Log info
Initial phase	0	N/A	Gravity loading	Staged construction	0.00 day	1	57	No errors.
<Phase 1>	1	0	Plastic	Staged construction	0.00 day	58	59	No errors.
<Phase 2>	2	1	Consolidation	Minimum pore pressure	0.00 day	60	159	Failed.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 6. Rangkuman Hasil Ketiga Proses Kalkulasi (sumber: hasil analisis)

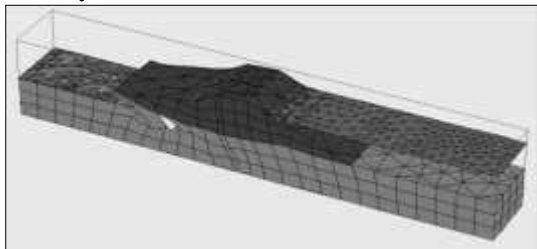
Nama Perilaku	Hasil Proses Kalkulasi Pertama	Hasil Proses Kalkulasi Kedua	Hasil Proses Kalkulasi Ketiga	Satuan
Tegangan total	- 834.01	-752.81	-199.31	KN/m ²
Regangan total	7.62	13.21	3.07	%
Tekanan air pori total	- 799.23	-178.64	-125.31	KN/m ²
Tekanan air pori pada titik A-A	-15	-25	- 25	KN/m ²
Penurunan Total	1.43	1.67	0.001242	m
Visualisasi keruntuhan	Runtuh	Runtuh	Tidak Runtuh	-

Adapun berdasarkan proses kalkulasi yang ketiga, tanpa diuji kembali melalui pemodelan melainkan langsung menggunakan program *Plaxis* dicari dimensi bendungan timbunan tanah yang aman dan juga efisien. Dimana dari dimensi yang sama seperti di pemodelan kemudian diperkecil sehingga diperoleh kondisi dimensi yang runtuh. Dimensi yang runtuh adalah sebagai berikut:

Tabel 7. Dimensi bendungan runtuh (sumber: hasil analisis)

Tanah Dasar		
Ukuran	(m)	Letak Geometri (x,z,y)
Panjang	75	$x = (0.00) - (75.00)$
Lebar	10	$z = (0.00) - (10.00)$
Tinggi	7.5	$y = (-7.5) - (0.00)$
Tubuh Bendung		
Ukuran	(m)	Letak Geometri (x,z,y)
Panjang Bagian Bawah	35	$x = (20.0) - (55.0)$
Panjang Bagian Atas	5	$x = (35.0) - (40.0)$
Tinggi	7.5	$y = (0.00) - (7.5)$
Lebar	10	$z = (0.00) - (10.00)$
Tinggi Muka Air		
Ukuran	(m)	Letak Geometri (y)
Tinggi	7.5	$(-7.5) - (7.5)$
	5.0	$(-7.5) - (5.0)$
	1.0	$(-7.5) - (1.0)$

Hasilnya adalah:



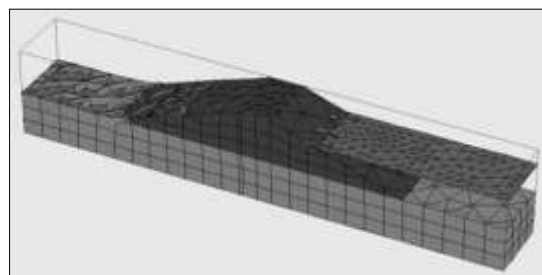
Gambar 2. Visualisasi akhir desain runtuh - tinggi air maksimum sampai minimum (sumber: hasil analisis)

Hasil diatas menunjukkan bahwa dengan dimensi tersebut dari ketinggian air maksimum sampai minimum, akan terjadi keruntuhan.

Kemudian, dibuat dimensi yang aman dan efisien sebagai berikut:

Tabel 8. Dimensi bendungan aman dan efisien (sumber: hasil analisis)

Tanah Dasar		
Ukuran	(m)	Letak Geometri (x,z,y)
Panjang	75	$x = (0.00) - (75.00)$
Lebar	10	$z = (0.00) - (10.00)$
Tinggi	7.5	$y = (-7.5) - (0.00)$
Tubuh Bendung		
Ukuran	(m)	Letak Geometri (x,z,y)
Panjang Bagian Bawah	45	$x = (15.0) - (60.0)$
Panjang Bagian Atas	5	$x = (35.0) - (40.0)$
Tinggi	7.5	$y = (0.00) - (7.5)$
Lebar	10	$z = (0.00) - (10.00)$
Tinggi Muka Air		
Ukuran	(m)	Letak Geometri (y)
Tinggi	5.00	$(-7.5) - (5.0)$



Gambar 3. Visualisasi akhir desain aman dan efisien. (sumber: hasil analisis)

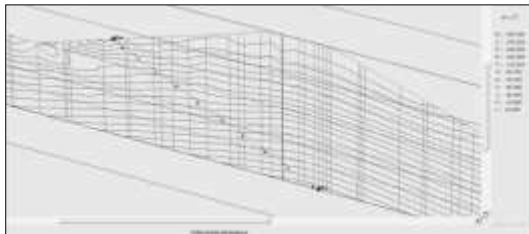
Dari proses kalkulasi ketiga juga dilakukan analisis faktor keamanan untuk memastikan hasil tersebut di atas dengan program *Plaxis 7.2*. Berikut hasil faktor keamanannya: Dimensi aman tetapi tidak efisien (lihat Tabel 1), $FK = 1.375$, Dimensi runtuh (lihat Tabel 6), $FK = 1.268$, Dimensi aman dan efisien (lihat Tabel 7), $FK = 1.319$

Tegangan-regangan

Hasil pemodelan yang hanya berdasarkan sampel uji tekan bebas yang diambil nilai tegangan maksimumnya dianggap masih kurang

karena beban yang diberikan terhadap tanah dipemodelan hanya beban air yang sesuai volume terhadap ketinggian air yang bukan tegangan maksimum dan tekanan air pori pada uji tekan bebas adalah kondisi tak teraliri sementara dalam pemodelan adalah kondisi teraliri.

Dari hasil ketiga kalkulasi program yang sesuai adalah kalkulasi bentuk kedua dan ketiga. Kalkulasi bentuk pertama dianggap tidak sesuai karena sudah melebihi tegangan maksimum, dimana dalam kondisi teraliri nilai tegangan maksimum tersebut akan lebih kecil jadi tidak akan $>771.5 \text{ KN/m}^2$. Dari hasil yang sudah sesuai dengan pemodelan kemudian diperkecil dimensi bendungannya sehingga memperoleh keadaan yang runtuh agar dapat perbedaan perilaku tegangan pada keadaan yang aman dan tidak aman, yakni:



Gambar 4. Garis kontur tegangan untuk kondisi aman (sumber: hasil analisis)



Gambar 5. Garis kontur tegangan untuk kondisi tidak aman (sumber: hasil analisis)

Sementara regangan maksimum total dari sampel uji tekan bebas dianggap belum dapat mewakili hasil regangan total keseluruhan di pemodelan. Yang dilihat adalah besar atau kecilnya regangan yang terjadi. Sementara untuk kondisi secara keseluruhan dilakukan langsung di pemodelan, namun karena penurunan yang terjadi sangat kecil maka nilainya tidak bisa diketahui.

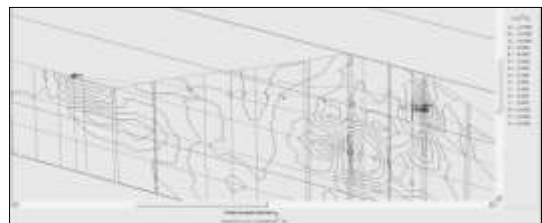
Berdasarkan hasil kalkulasi bentuk ketiga dapat dibuktikan bahwa hasil tersebut adalah benar, sebagai berikut: Terjadi penurunan pada program = 0.0012m . jika diskalakan dalam model = 0.024mm , yang mana tidak dapat dilihat secara kasak mata. Sementara untuk penurunan

mencapai 1m , jika diskalakan dalam model = 2cm , dapat terlihat jelas. Jadi nilai regangan yang paling kecil yang sesuai dengan pemodelan adalah pada kalkulasi bentuk ketiga.

Adapun perbedaan perilaku regangan untuk kondisi aman dan tidak aman dapat dilihat dari gambar berikut:



Gambar 6. Garis kontur regangan untuk kondisi aman (sumber: hasil analisis)

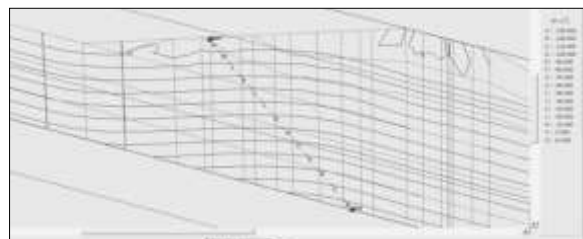


Gambar 7. Garis kontur regangan untuk kondisi tidak aman (sumber: hasil analisis)

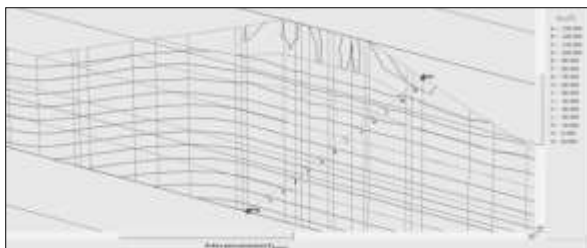
Tekanan air pori

Dalam pemodelan hasil dari tekanan air pori di pemodelan hanya dilakukan pada satu titik, tidak dilakukan pengujian untuk mengetahui tekanan air pori total. Hasilnya mendekati hasil kalkulasi bentuk pertama pada program.

Untuk kondisi runtuh, tekanan air pori diuji sampai pada kondisi air minimum, menunjukkan bahwa pengaruh air yang bisa menyebabkan kelongsoran pada bendungan adalah kecil dikarenakan nilai permeabilitas tanah tubuh bendung = dengan nol. Berikut perbedaan perilaku kondisi aman dan tidak aman:

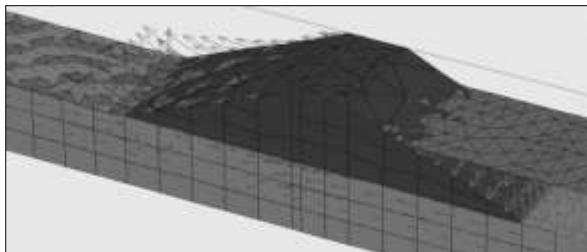


Gambar 8. Garis kontur tekanan air pori kondisi aman (sumber: hasil analisis)



Gambar 9. Garis kontur tekanan air pori kondisi tidak aman (sumber: hasil analisis)

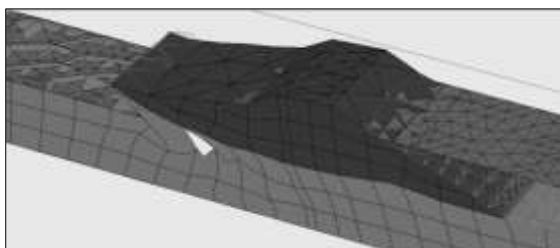
Stabilitas



Gambar 10. Arah keruntuhan (sumber: hasil analisis)

Hasil di pemodelan yang mana menunjukkan keadaan tidak runtuh dan penurunan yang hampir tidak ada, adalah sama dengan hasil kalkulasi bentuk ketiga pada program *plaxis*. Jadi dari ketiga proses kalkulasi yang digunakan, yang menghasilkan kondisi mendekati seperti hasil pemodelan adalah proses yang ketiga yang sama dari hasil penurunan, regangan, dan kestabilan serta relevan dengan hasil tegangan. Dari bentuk kalkulasi tersebut kemudian didesain dimensi yang aman dan efisien. Dimensi tersebut dinyatakan aman atau tidak aman atau kestabilan lereng diragukan serta efisien berdasarkan visualisasi akhir dan nilai faktor keamanannya.

Untuk kondisi runtuh sendiri, seperti pada gambar berikut:



Gambar 11. Setelah terdeformasi (sumber: hasil analisis)

Menunjukkan arah keruntuhan adalah berbentuk setengah lingkaran/ log spiral/ hiperbola/ bentuk lengkung tidak beraturan. Sementara kedudukan tanah yang terdeformasi menunjukkan kondisi tubuh bendung yang relatif

utuh tetapi amblas (*failure*) diakibatkan tanah dasar yang memikul tubuh bendung terjadi penurunan. Perilaku pergerakan tanah yang terjadi termasuk tipe majemuk yakni longsor rotasi dan penyebaran lateral.

PENUTUP

Kesimpulan

Hasil pemodelan berdasarkan geometri rencana, yakni: Kondisi bendungan tidak terjadi keruntuhan dan tidak terjadi penurunan. Setelah dipadatkan tubuh bendung menghasilkan nilai koefisien permeabilitas, $k \approx 0$. Hasil program yang mendekati hasil dipemodelan dengan geometri rencana adalah proses kalkulasi ketiga, yakni:

Tahap awal: *Gravity loading – Staged Construction*; Tahap pertama: *Plastic – Staged Construction*; Tahap kedua: *Consolidation – Minimum Pore Pressure*. Dengan hasil:
Tegangan total = - 199.31 KN/m²
Regangan total = 3.07%
Tekanan air pori = - 125.31 KN/m²
Kestabilan = Tidak terjadi keruntuhan
Faktor keamanan = 1.375

Berdasarkan proses kalkulasi ketiga pada program *plaxis*, karena dianggap faktor keamanan tergolong besar kemudian dimensi diperkecil hingga mendapat kondisi yang runtuh (FK = 1.268) dan kondisi yang aman tetapi lebih efisien dengan FK = 1.319; dimensi bendungnya adalah panjang bagian bawah = 45m; tinggi = 7.5m; panjang bagian atas = 5m; lebar = 10m.

Saran

Pemodelan yang lebih baik harus mempertimbangkan interaksi antara tanah dengan bahan yang menjadi wadah untuk pemodelan. Nilai $k \neq 0$, untuk melihat pola aliran yang terjadi pada program *plaxis*. Kondisi batas untuk program yang menggunakan metode elemen hingga sebaiknya ditinjau terlebih dahulu baru di buat pemodelan.

DAFTAR PUSTAKA

Anonim, *Panduan Praktikum Mekanika Tanah*, Laboratorium Mekanika Tanah, Fakultas Teknik UNSRAT, Manado, 2009.

Das Braja M., Endah Noor, Mochtar Indrasurya B, *Mekanika Tanah Prinsip-Prinsip*

- Geoteknik, Jilid 1,2, Erlangga, Jakarta,1995.
- Iansen R.B. (1980), *Dams and Public Safety*; U.S. Department of the Interior.
- Karnawati D. 2000, *The Importance of Low Intensity Rainfall on Landslide Occurrence*, Forum Teknik, Vol 24 / No.1, Univ. Gadjah Mada, Yogyakarta
- PU Tata Ruang, Lampiran L1, Klasifikasi dan Faktor Penyebab Bencana Longsor, Pedoman Pengendalian Pemanfaatan Ruang di Kawasan Rawan Bencana Longsor.
- Plaxis 2D Version*, 1998, *Manual Book*, A.A. Balkema, P.O. Box 1675, 3000 BR Rotterdam, Netherlands.
- Plaxis 3D Foundation Version 1.5*, 2006, *Manual Book*, A.A. Balkema, P.O. Box1675, 3000 BR Rotterdam, Netherlands.
- Sabtosa Budi,Suprpto Heri, HS Suryadi, *Seri Diktat Kuliah DasarMekanika Tanah*, Gunadarma.
- Saartje Monintja, Ir., *Bahan Ajar Mekanika Tanah I*, Dana PNBP Fakultas Teknik UNSRAT, 2010.
- Soedarmo, Ir., dan Purnomo, Ir., *Mekanika Tanah II*, Karnisius Yogyakarta, 1997
- Soedibyo,Ir., *Teknik Bendung*, PT.Pradnya Paramita,Jakarta, 2003
- Sompie O.B.A, 2010, *Improvement of Soil Consolidation Test & Inclusion of Secondary Compression on Hydraulic Structure Design*, UNSRAT, Manado.